

INFLUÊNCIA DO TIPO DE ADIÇÃO MINERAL EM MISTURAS BINÁRIAS E TERNÁRIAS NO E_{CORR} , R_p , I_{CORR} E EIS DE CONCRETOS EXPOSTOS À CONDIÇÃO AGRESSIVA CONTENDO CLORETOS

Andrielli M. de Oliveira^{1,*}, Caroliny Alves¹, Oswaldo Cascudo¹ e Thiago C. Cardoso²

¹*Departamento de Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil*

²*Departamento de Pesquisa em Inovação da Construção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil*

Palavras-chave: Corrosão, Cloretos, Adição Mineral, Técnicas Eletroquímicas.

Resumo. É objetivo deste trabalho determinar os parâmetros de potencial de corrosão (E_{corr}), resistência de polarização (R_p), taxa de corrosão eletroquímica (I_{corr}) e diagrama de Nyquist de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) de concretos expostos à condição agressiva, por meio de ciclos semanais de molhagem em solução de NaCl a 50 g/l e posterior secagem, durante 300 dias. As variáveis estudadas foram: relação água/ligante – a/lig (0,40 e 0,60 para melhor visualização do fenômeno corrosivo e tipo de concreto (misturas binárias com metacaulim no teor de 10% em substituição parcial em massa de cimento, em comparação ao concreto de referência – sem adições). Além disso, para a relação a/lig 0,60, a mistura ternária de sílica ativa e nanossílica também foi avaliada. Como resultado, concretos com adições minerais apresentaram maiores valores de R_p e menores taxas de corrosão (inferiores a $1,0 \mu A/cm^2$). O efeito da relação a/lig foi significativo para os concretos sem adições minerais e menos importante para os concretos com adições minerais. Em especial, o concreto sem adições e relação a/lig de 0,60 apresentou valor de taxa de corrosão significativo e valor muito baixo de R_p ($2,3 k\Omega \cdot cm^2$), denotando intenso fenômeno corrosivo. Concretos com adições minerais apresentaram valores de R_p entre 13 e 21 $k\Omega \cdot cm^2$ e permaneceram em uma faixa de valores representativos de início de corrosão ativa.

Endereços de e-mail: andriellimorais@ufg.br^{*}, carolinyalves@discente.ufg.br, ocascudo@ufg.br, thiagocostacardoso@gmail.com

INFLUENCE OF THE TYPE OF MINERAL ADDITION IN BINARY AND TERNARY MIXTURES ON THE E_{CORR} , R_p , I_{CORR} AND EIS OF CONCRETES EXPOSED TO AGGRESSIVE CONDITIONS CONTAINING CHLORIDES

Keywords: Corrosion, Chlorides, Mineral Addition, Electrochemical Techniques.

Abstract. The focus of this paper is to determine the parameters of corrosion potential (E_{corr}), polarization resistance (R_p) and electrochemical corrosion rate (I_{corr}) of concrete exposed to the aggressive condition, through weekly cycles of wetting in NaCl solution at 50 g/l and drying, for 300 days under the influence of the variables water/binder ratio - w/b (0.40 and 0.60) for better visualization of the corrosive phenomenon and the type of concrete (binary mixture of metakaolin in the content of 10% partial replacement by mass of cement, compared to reference concrete – without additions). In addition, for water/binder ratio - w/b of 0.60, the ternary mixture of silica fume and nanosilica was also evaluated. As a result, concretes with mineral additions showed higher R_p values and lower corrosion rates (less than $1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). The effect of the w/b ratio was significant for concretes without mineral additions and less important for concretes with mineral additions. In particular, the concrete without additions and a w/b ratio of 0.60 presented a significant corrosion value and a very low value of R_p ($2.3 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$), denoting an intense corrosive phenomenon. Concretes with mineral additions showed R_p values between 13 and $21 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ and they remained in a range of active corrosion initiation.

1 INTRODUÇÃO

Cloretos são íons que podem afetar o desempenho de estruturas de concreto armado, situadas em ambientes marinhos, por meio da corrosão de armaduras. Neste sentido, projetar e executar essas estruturas com desempenho, baseando-se em indicadores de durabilidade e modelos preditivos de vida útil, é fundamental sob o ponto de vista econômico, social, ambiental, dentre outros [5, 11, 17, 18, 19, 21, 22, 23].

Por esse ângulo, os benefícios associados à incorporação de materiais suplementares ou pozolânicos em matrizes cimentícias têm sido amplamente estudados nos últimos anos. Dentre suas diversas contribuições, pode-se destacar a melhoria na durabilidade do concreto, dificultando o ingresso de agentes agressivos, como os íons cloreto [10, 15, 21, 25, 26].

Técnicas eletroquímicas de caráter não destrutivo ou não perturbativo podem ser utilizadas para avaliar a corrosão na interface aço-concreto, tanto em seu período de iniciação quanto no período de propagação da corrosão[21].

Assim, é objetivo deste artigo determinar os parâmetros de potencial de corrosão (E_{corr}), resistência de polarização (R_p) e taxa de corrosão eletroquímica (I_{corr}) de concretos expostos à condição agressiva, contendo cloretos (solução de NaCl a 50 g/l), durante 300 dias. Além disso, diagrama de Nyquist de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) também foi obtido. As variáveis estudadas foram relação água/ligante – a/lig (0,40 e 0,60) para melhor visualização do fenômeno corrosivo e o tipo de concreto (mistura binária de metacaulim no teor de 10% em substituição parcial em massa de cimento, em comparação ao concreto de referência – sem adições). Adicionalmente, para a relação a/lig 0,60, a mistura ternária de sílica ativa e nanossílica também foi avaliada. Um ponto importante de contribuição é a obtenção de parâmetros termodinâmicos e cinéticos do processo de corrosão.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental considerou a produção de cinco tipos de concreto, sendo duas relações água/ligante - a/lig (0,40 e 0,60) e três situações de matrizes cimentícias (referência, sem adições minerais - REF e com 10% de metacaulim - MM). Para a relação a/lig 0,60 também foi moldado o concreto terciário com 9% de sílica ativa e 1% de nanossílica (SN).

A variável independente estudada foi a relação a/lig , proposta com base em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa GEDur (Grupo de Estudos em Durabilidade) do PPG-GECON/UFG nos anos de 2001 a 2022 [6, 12, 13, 14, 21, 22, 23]. Ao mesmo tempo, a justificativa pela escolha e teor de adições minerais em misturas binárias e terciárias, em substituição parcial de massa de cimento, também foram escolhidos com base na literatura [21, 24]. A Figura 1 apresenta o fluxograma das variáveis estudadas.

2.1 Materiais

Os materiais empregados foram: cimento CP II-F 40, com características físicas e químicas que atenderam aos requisitos da ABNT NBR 16697:2018 [4], areia natural de origem quartzosa com módulo de finura 2,40, massa específica 2,64 g/cm³, dimensão máxima característica de 2,36 mm e situada, majoritariamente, dentro da faixa utilizável segundo a ABNT NBR 7211:2009 [3]; agregado graúdo derivado da britagem de rocha granítica com módulo de finura 6,57, massa específica 2,72 g/cm³, pertencente à zona granulométrica pela ABNT NBR 7211:2009 [3] (relação $d/D = 9,5/25$) e água proveniente da companhia de saneamento de Goiás.

Foram utilizadas adições minerais de sílica ativa, nanossílica e metacaulim nos concretos

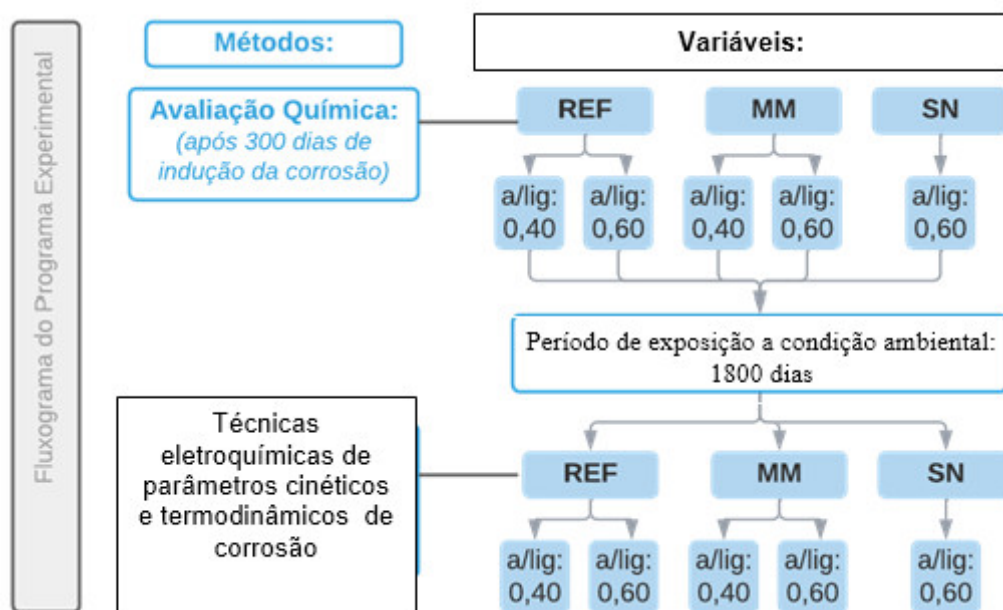


Figura 1: Fluxograma das variáveis e do estudo

com matrizes cimentícias modificadas. A Tabela 1 detalha as características físicas e químicas da sílica ativa e do metacaulim empregados neste estudo. A nanossílica utilizada foi estabilizada em dispersão aquosa contendo aditivos de alta redução de água, superplastificantes tipo II e neutro.

2.2 Produção dos Concretos e Preparação dos Corpos de Prova para Ensaio

A dosagem dos concretos (Tabela 2) foi precedida por um estudo racional e experimental aplicado aos concretos de referência (REF4 e REF6), empregando-se o método IPT/EPUSP e com base em [7, 20]. Dessa forma, foram produzidos corpos de prova em formato cúbico (CPc), com dimensões de 15 cm x 15 cm x 15 cm para cada tipo de concreto, baseando-se no experimento de Oliveira e Cascudo [21]. O procedimento de cura dos corpos de prova foi padronizado em câmara úmida com umidade relativa (UR) de 95% e temperatura de 23 ± 2 °C durante 28 dias. Após isso, os corpos de prova permaneceram em condições de laboratório até os 91 dias de idade.

Em seguida, iniciou-se o procedimento para indução da corrosão por cloretos, por meio de 43 ciclos semanais de umidificação e secagem, correspondendo ao total de 300 dias. Cada ciclo correspondeu a dois dias de imersão parcial dos corpos de prova em solução com cloreto de sódio (50 g/l) e cinco dias em condições de secagem em ambiente de laboratório (Figura 2). A definição dos tipo de ciclo foi baseada em estudos de Cascudo [9], pois considera-se que o concreto absorve água em maior velocidade do que a perde durante a sua secagem. Cada condição estudada, teve um corpo de prova com quatro armaduras para medidas eletroquímicas.

Entre 300 e 1800 dias, os concretos permaneceram em ambiente de laboratório. Ressalta-se que após o período de 1800 dias, as amostras foram mantidas em condição de exposição em câmara úmida com umidade relativa de 95% e temperatura de 23 ± 2 °C por 22 dias, período no qual foi efetuado 3 medidas de R_p , E_{corr} , e I_{corr} e uma medida de impedância eletroquímica (EIS).

Tabela 1: Caracterização das adições minerais utilizadas (Adaptado de [20])

Propriedades determinadas	Resultado obtido		Método de ensaio	Limites	
	Metacaulim	Sílica ativa			
Massa específica (g/cm ³)	2,56	2,25	NBR NM 23 ou IT.DCT.CA.118	-	
Área específica- B.E.T (m ² /g)	30,99	19,5	ASTM C 1069	≥ 15,0	
Diâmetro médio dos grãos (D50) (μm)	0,61	-	Sedigrafia	-	
Constituintes químicos (%)	Perda ao fogo		NBR NM 18	≤ 10,0	
	Óxido de magnésio (MgO)		IT.DCT.CA.71	-	
	Dióxido de silício (SiO ₂)			-	
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)			-	
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		NBR NM 14	-	
	Óxido de cálcio (CaO)			-	
	Álcalis totais (%)	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,41	-	-
		Óxido de potássio (K ₂ O)	1,33	ASTM C 114	-
		Equivalente alcalino em (Na ₂ O)	1,23	-	-
	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)		90,46	95,89	-
Índice de atividade	Com cal (MPa)		NBR 5751	≥ 6,0	
	-	8,2	IT.DCT.CA.135	≥ 6,0	
Índice de desempenho	Com cimento Portland (7 dias) (%)		NBR 15894-2	-	
	-	107,8	IT.DCT.CA.136	≥ 75,0	
	Com cimento Portland (%) (28 dias)		NBR 5752	-	
	-	125,4	IT.DCT.CA.136	≥ 75,0	

Os ensaios relativos à caracterização da sílica ativa basearam-se em instruções técnicas aplicadas nos laboratórios da Eletrobrás Furnas S.A.

Tabela 2: Composição dos concretos estudados [7]

Tipo de concreto	<i>a/lig</i>	Consumo de cimento (kg/m ³)	Cimento (Traço)	Adições Minerais (kg/m ³)	Areia (Traço)	Brita (Traço)	Resistência à compressão 28 dias (MPa)
REF4	0,4	365	1	0,00	2,37	2,76	50
REF6	0,6	260			3,55	3,73	35
MM4	0,4	330	1	0,10 MM	2,36	2,75	66
MM6	0,6	236			3,54	3,72	37
SN6	0,6	234	1	0,01 NS 0,09 SA	3,53	3,71	40

As abreviações SA, NS e MM significam, respectivamente, sílica ativa, nanossílica e metacaulim

2.3 Técnicas Eletroquímicas

Para as medidas de E_{corr} , R_p e I_{corr} , os corpos de prova cúbicos foram abrigados em uma célula de corrosão, composta por três eletrodos, a saber: um eletrodo de referência (eletrodo de calomelano saturado – SCE), um eletrodo de trabalho (armadura de aço embutida ao concreto) e um contra eletrodo de aço inoxidável. Ressalta-se que este conjunto de medição foi inserido em uma gaiola de Faraday para evitar interferências de campo elétrico externo [22].

Empregou-se o equipamento Potenciostato PARSTAT 4000a (Figura 3), gerenciado pelos



Figura 2: Corpos de prova de concreto empregados no estudo

softwares ZView e VersaStudio.

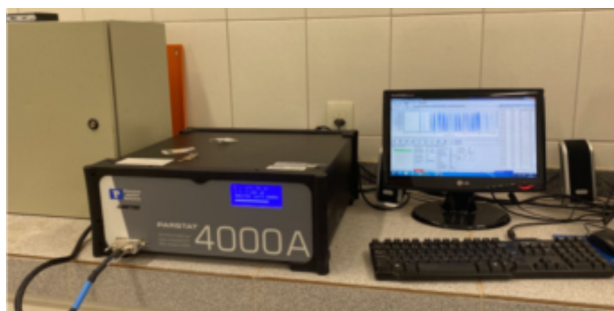


Figura 3: Potenciostato conectado ao computador e a célula de corrosão

Os aspectos termodinâmicos (E_{corr}) e cinéticos (R_p e I_{corr}) da corrosão nas barras de aço foram avaliados para detectar alterações advindas nos parâmetros eletroquímicos na interface aço-concreto.

Para avaliação do E_{corr} , foram seguidas as recomendações da ASTM C 876:2015 [1], das quais preconiza que se o E_{corr} for mais eletropositivo do que -126 mV/SCE o aço encontra-se em probabilidade de corrosão menor do que 10%, enquanto que para E_{corr} mais eletronegativo do que -276 mV/SCE o aço terá probabilidade de corrosão superior a 90%. Enquanto que para potenciais de corrosão entre -126 mV/SCE e -276 mV/SCE, a probabilidade de corrosão é incerta.

Foi adotado ± 10 mV de polarização, taxa de varredura na direção anódica de $0,167$ mV/s para R_p . Para avaliar as densidades de corrente de corrosão (I_{corr}) foi utilizada a equação de Stern-Geary:

$$I_{\text{corr}} = B/R_p \quad (1)$$

Os valores adotados para B foram de 26 mV para aço em estado de corrosão ativo e 52 mV para aço em condição passiva, conforme o que é descrito em [2].

As medidas eletroquímicas foram tomadas após 300 dias de indução à penetração de cloretos e sob umidificação em câmara úmida, considerando três medidas durante três semanas na idade

acima de 1800 dias dos corpos de prova. Os resultados apresentados são às médias das leituras eletroquímicas obtidas das quatro armaduras inseridas nos corpo de provas para cada tipo de concreto. Uma medida de impedância eletroquímica (EIS), representativa para cada condição de estudo, também foi obtida na forma de diagrama de Nyquist, junto a primeira medida de E_{corr} , R_p e I_{corr} .

3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

São apresentados na Figura 4 os resultados de E_{corr} e I_{corr} referentes às médias das leituras eletroquímicas obtidas das quatro armaduras inseridas em corpo de prova para cada tipo de concreto/condição de estudo.

Assim, para a avaliação termodinâmica do processo eletroquímico de corrosão (E_{corr}), adotou-se os critérios preconizados pela ASTM C876:2015 [1]. No que tange a avaliação da cinética, empregou-se os parâmetros descritos por Andrade e Alonso (2001).

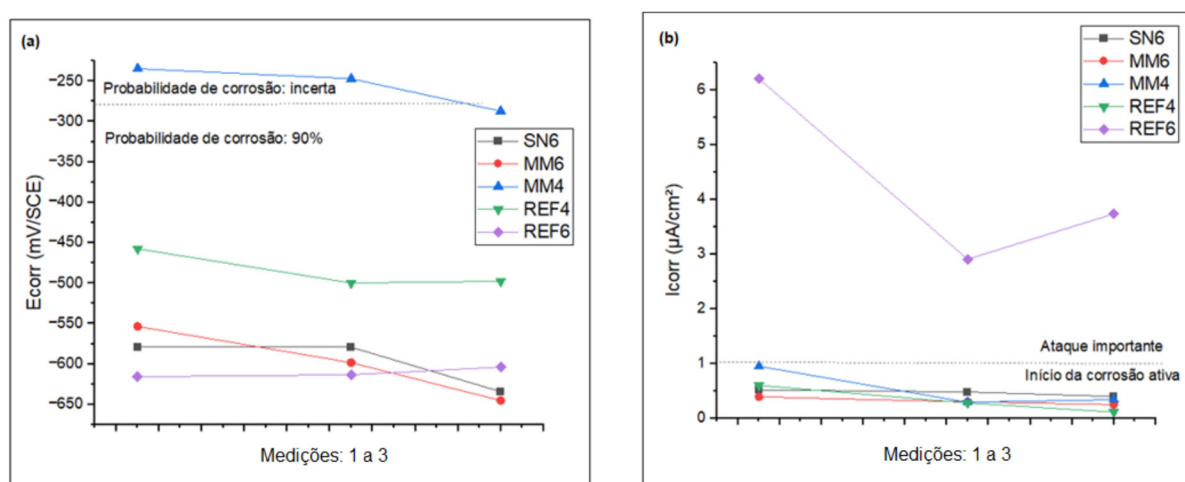


Figura 4: Dados obtidos das técnicas eletroquímicas: (a) E_{corr} e (b) I_{corr}

Durante as três leituras realizadas, a Figura 4(a) apresenta o valor de E_{corr} com probabilidade de corrosão superior a 90% para todos os concretos de referência e com a incorporação de adições minerais, com exceção da amostra MM4 que no período inicial de observação apresentou potencial mais eletropositivo que -276 mV/SCE com probabilidade de corrosão incerta e depois com probabilidade de corrosão superior a 90%.

A partir da Figura 4(b), confirma-se que o concreto de referência a/lig : 0,60 (REF6), foi o único que apresentou altas taxas de corrosão e um ataque importante na armadura. Enquanto que os demais concretos com incorporação de adições minerais em misturas binárias e terciárias e o concreto referência no teor a/lig 0,40 (REF4) apresentaram taxas de corrosão em um ritmo mais lento do que REF6, entretanto com corrosão ativa.

Como esperado, a relação a/lig apresentou um efeito importante na proteção das armaduras dos concretos e na observação do fenômeno de corrosão para os concretos sem adições. Observando apenas I_{corr} , em termos iniciais e preliminares, o REF4 apresentou comportamento próximo aos concretos com metacaulim e sílica ativa e nanossílica, mesmo com maiores relações de a/lig .

Para R_p , os valores médios entre a 1ª e a 3ª leituras (entre 1800 e 1821 dias de idade e após 300 dias de exposição em ambiente agressivo contendo cloretos) estão apresentados na Tabela

3.

Tabela 3: Valores individuais (1ª a 3ª leituras) de resistência de polarização dos concretos estudados

Tipos de Concreto	R_p (k Ω ·cm ²)		
	1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura
REF4	15,7	14,4	5,9
REF6	5,8	6,8	2,3
SN6	26,8	25,1	20,6
MM4	49,3	14,9	17,5
MM6	20,3	15,4	13,0

Pode-se observar que os valores de R_p diminuíram com o número de leituras e com o acréscimo dos dias em câmara úmida dos corpos de prova pelo efeito de ganho de umidade e a influência dela no fenômeno corrosivo e movimentação de íons cloretos.

Fica nítido o efeito do acréscimo da relação a/lig no fenômeno corrosivo, tanto para os concretos com, quanto para os concretos sem adições minerais. Mesmo para relação a/lig maiores, o metacaulim e a sílica ativa e nanossílica reduziram a velocidade de corrosão (Figura 4b e Tabela 3). O concreto SN6 apresentou maiores valores de R_p que o concreto MM6. Isso parece indicar um efeito maior de empacotamento do concreto pela combinação da adição da nanossílica e da sílica ativa.

Os concretos com incorporação de adições minerais, de um modo geral, possuíram melhor desempenho em relação aos concretos de referência, pois apresentam maiores magnitudes de R_p e menores valores de I_{corr} . Esta tendência de comportamento encontra-se em consonância com [8, 21], visto que a R_p representa a inércia que um sistema possui em desenvolver um processo eletroquímico de corrosão. Desse modo, quanto maior for os valores de R_p , menos intensos serão os valores de velocidades/taxas de corrosão encontradas (I_{corr}).

Dados representativos de resultados de impedância, por meio de diagrama de Nyquist, estão apresentados na Figura 5. Observa-se comportamentos e mecanismos diferentes relacionados a corrosão das armaduras embutidas aos concretos, tanto no campo real (Z_{re}) quanto no campo imaginário (Z_{im}).

No que tange à relação a/lig , nota-se também desempenhos diferentes para os concretos REF6 e REF4 e MM6 e MM4, sobretudo no campo real (Z_{re}). Isso denota a diferença em termos de porosidade desses concretos e sua capacidade de proteção das armaduras de aço quanto a corrosão induzida por cloretos.

Percebe-se que o concreto MM4 exibe maior impedância e isso pode ser confirmado com o valor de R_p (49,4 k Ω ·cm²) no instante em que a leituras foram realizadas. Isso talvez seja em virtude de umidade interna no momento da medida, o que denota maior resistividade, isto é, maior resistência ôhmica em relação aos demais concretos estudados. Os demais concretos exibem impedâncias menores, em geral, comparativamente ao MM4.

O concreto REF6 apresentou maior impedância no campo imaginário, muito embora no campo real a impedância tenha sido muito reduzida, dando forte indicação de que também para esse concreto houve despassivação da armadura. Esse comportamento é confirmado pelos dados de R_p (5,8 k Ω ·cm²) e E_{corr} .

Fica evidente também da Figura 5, um comportamento diferente para o concreto SN6, com maior impedância no campo real (e valor de R_p de 26,8 k Ω ·cm²). Os concretos REF4 e MM6 apresentam comportamentos mais semelhantes em termos de mecanismos (Figura 5) na ocasião da medida de impedância.

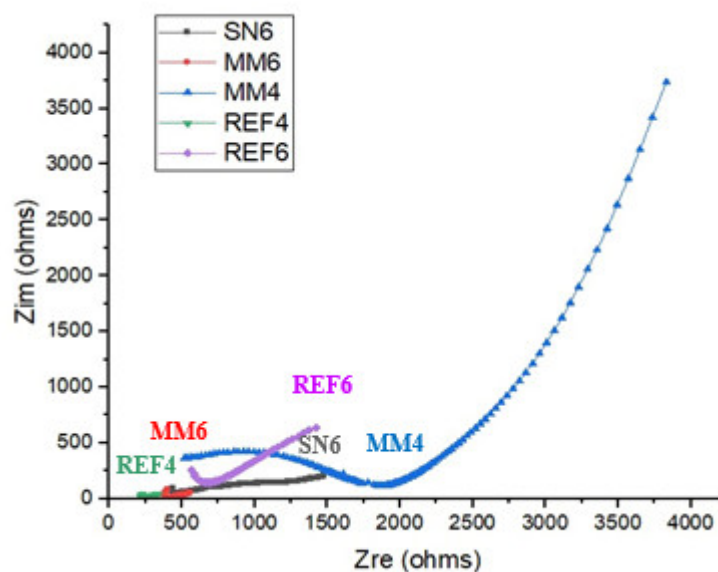


Figura 5: Diagrama de Nyquist: dados representativos de *EIS* para os concretos estudados com as frequências de 100 kHz a 10 MHz

3.1 Discussão Global

É evidente a contribuição dos sistemas cimentícios modificados com a incorporações minerais, especialmente as pozolanas de alta finura como sílica ativa e nanossílica e metacaulim, no desempenho em relação aos ataques por cloretos [21]. Isso delonga o ingresso de íons cloretos no interior concreto, assim, espera-se que a resistência contra à corrosão seja melhorada em função da microestrutura densa do concreto que se mostra eficaz na proteção da armadura contra à corrosão [16].

Desta forma, em ordem de desempenho dos concretos em relação a E_{corr} , R_p , I_{corr} e *EIS* podemos enumerar em ordem crescente: MM4, SN6, MM6, seguido pelos concretos REF4 e REF6.

Em relação às amostras de referência, o concreto REF6 obteve o pior desempenho nos testes realizados, em função do maior transporte de cloretos, devido à sua estrutura porosa, oferecida pela sua alta relação a/lig .

Para os concretos sem adições minerais, a relação a/lig é um dos parâmetros mais importantes em todo contexto da corrosão, pelo fato que ela determina a qualidade do concreto, ou seja, define as características de compacidade e porosidade da matriz de cimento endurecida [8]. Logo, um dos reflexos obtidos foi o baixo valor de R_p de $2,3 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ e alto valor de potencial de corrosão eletronegativo (-604 mV/SCE), ou seja, probabilidade de ocorrência de corrosão superior a 90%.

A entrada de cloretos atingindo as armaduras determina comportamentos e mecanismos diferentes relacionados à corrosão, tanto no campo real (Z_{re}) quanto no campo imaginário (Z_{im}). Isso ficou evidente, por meio do diagrama de Nyquist da *EIS*.

4 CONCLUSÕES

As seguintes conclusões puderam ser obtidas do presente estudo:

- de forma geral, os concretos com adições minerais promoveram valores mais eletropositivos de E_{corr} e valores mais elevados de R_p . Isso expressa menor taxa/velocidade (I_{corr})

- do processo corrosivo;
- os concretos com adições minerais tiveram desempenho muito próximo em relação a I_{corr} e E_{corr} , a exceção do concreto MM4;
 - o concreto SN6 parece ter apresentado um desempenho ligeiramente superior quando comparado ao concreto MM6. Cabe a análise de custo financeiro para a decisão técnica e tecnológica da escolha do melhor concreto;
 - A porosidade dos concretos determinou a entrada de cloretos que atingiu as armaduras e isso foi refletido em diferentes mecanismos no diagrama de Nyquist, tanto no campo real (Z_{re}), quanto no campo imaginário (Z_{im}) da impedância;
 - em relação aos concretos sem adições minerais, como esperado, o concreto com maior relação a/lig apresentou maiores valores de taxas de corrosão e menores valores de potencial de corrosão;
 - em ordem de desempenho dos concretos, em relação a E_{corr} , R_p , I_{corr} e EIS , podemos enumerar em ordem crescente: MM4, SN6, MM6, seguido pelos concretos REF4 e REF6; e
 - fica evidente o efeito positivo das adições minerais em manter um ritmo do fenômeno corrosivo mais lento, denotando maior durabilidade e desempenho desses concretos em ambientes agressivos contendo cloretos.

Agradecimentos

Este trabalho faz parte do projeto de P&D - PD. 0394-1704-2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, desenvolvido pela Eletrobrás FURNAS e FUNAPE/UFG/EECA/LABITECC. Os autores expressam agradecimento a todos esses parceiros, bem como ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - e à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelas bolsas concedidas aos pesquisadores autores deste artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] American Society for Testing and Materials. *ASTM C 876: Standard Test for Half-Cell Potentials Of Uncoated Reinforcing Steel In Concrete*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2015.
- [2] C. Andrade e C. Alonso. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials*, 15(2):141–145, 2001. ISSN 0950-0618. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00063-5).
- [3] Associação Brasileira de Normas técnicas. *ABNT NBR 7211:2009 Agregados para concreto - Especificação*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2009.
- [4] Associação Brasileira de Normas técnicas. *ABNT NBR 16697:2018 Cimento Portland - Requisitos*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2018.
- [5] V. Baroghel-Bouny, B. Capra e S. Laurens. *La durabilité des armatures et du béton d'enrobage*, capítulo 9, páginas 303–385. Presses de l'Éc. Nat. Ponts et Chaussées, 2 edição, 2008.
- [6] H. Carasek e O. Cascudo. Projeto integrado: características do concreto de cobertura e o seu papel na durabilidade das estruturas de concreto armado, 2001. Projeto de Pesquisa.
- [7] T. C. Cardoso e O. Cascudo. Análise de perfis de cloretos livres e totais em concretos com adições minerais. In *Anais do 3º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado*. São Carlos, São Paulo, Brasil, 2018.

- [8] O. Cascudo. *O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas*. Pini, 1997.
- [9] O. Cascudo. Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação. 2000.
- [10] O. Cascudo, H. Carasek, A. L. M. P. Yssorche-Cubaynes e J. P. Ollivier. Evaluation of cover concrete by analysis of chloride diffusion coefficients. *ACI Special Publications*, 229:135–150, 2005.
- [11] O. Cascudo, R. Teodoro, A. M. Oliveira e H. Carasek. Effect of different metakaolins on chloride-related durability of concrete. *ACI MATERIALS JOURNAL*, 118(3):3–14, 2021. <https://doi.org/10.14359/51732634>.
- [12] A. Castro. *Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia – GO, Brasil, 2003.
- [13] R. C. L. Fagundes. *Estudo de ensaios e parâmetros de transporte de cloretos no concreto para aplicação em modelos preditivos de vida útil*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia – GO, Brasil, 2022.
- [14] R. B. Ferreira. *Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloreto*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia – GO, Brasil, 2003.
- [15] C. P. Figueiredo, F. B. Santos, O. Cascudo, H. Carasek, P. Cachim e A. Velosa. The role of metakaolin in the protection of concrete against the deleterious action of chlorides. *Ibracon Structures and Materials Journal*, 7(4):685–708, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952014000400008>.
- [16] A. Ghanei, H. Eskandari-Naddaf, T. Ozbakkaloglu e A. Davoodi. Electrochemical and statistical analyses of the combined effect of air-entraining admixture and microsilica on corrosion of reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 262:120768, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120768>.
- [17] K. M. Liew, A. O. Sojobi e L. W. Zhang. Green concrete: Prospects and challenges. *Construction and Building Materials*, 156:1063–1095, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.008>.
- [18] R. C. Lopes, A. M. Oliveira e O. Cascudo. Modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos: contribuição ao estado da arte por meio de revisão sistemática da literatura – parte 1. *Materia (Rio J.)*, 27(2), 2022. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-44821>.
- [19] R. C. Lopes, A. M. Oliveira e O. Cascudo. Modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos: contribuição ao estado da arte por meio de revisão sistemática da literatura – parte 2. *Materia (Rio J.)*, 27(2), 2022. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-44823>.
- [20] A. M. Martins. *Transporte de cloretos em concretos com adições minerais e o desempenho em relação à corrosão das armaduras*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia – GO, Brasil, 2016.
- [21] A. M. Oliveira e O. Cascudo. Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 192:467–477, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.100>.
- [22] A. M. Oliveira, O. Cascudo e A. Castro. Effect of the type of concrete with mineral additions on the reinforcement corrosion induced by chlorides - analysis in the same mechanical

- strength class. In C. Serrat, J.R. Casas, e V. Gibert, editores, *Current Topics and Trends on Durability of Building Materials and Components*, páginas 1401–1407. Barcelona, Spain, 2020.
- [23] A. M. Oliveira, O. Cascudo, A. Castro e H. Carasek. Performance of concrete with mineral additions submitted to chlorides in to the corrosion potential technique - a statistical and engineering analysis. In M. Menezes, M.R. Veiga, A.S. Silva, L. Nunes, e J.S. Machad, editores, *Livro de Atas do ENCORE 2020 – 4º Encontro de reabilitação e conservação de edifícios*, páginas 591–602. Lisboa, Portugal, 2020.
- [24] A. P. O. Pereira, O. Cascudo e H. Carasek. Durabilidade de concretos, argamassas e pastas contendo nanossílica: Mapeamento e revisão sistemática da literatura. In *Anais do 3º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado*. São Carlos, São Paulo, Brasil, 2018.
- [25] A. A. Ramezaniapour e H. Bahrami Jovein. Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. *Construction and Building Materials*, 30:470–479, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.050>.
- [26] M. Valipour, F. Pargar, M. Shekarchi e S. Khani. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. *Construction and Building Materials*, 41:879–888, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.054>.